

Oxy-PC 발전 플랜트용 Dynamic Engineering Simulator 개발에 관한 고찰

유광명*, 김중안**
한전 전력연구원*

Study of Dynamic Engineering Simulator for Oxy-PC Power Plant

Kwang Myung Yu*, Jong An Kim**
Korea Electric Power Research Institute*

Abstract - Oxy-PC 발전시스템은 화석 연료를 연소하는 과정에서 발생하는 다량의 이산화탄소를 회수처리 하기 위해 고려되고 있는 방법 중 하나이며, 신규 발전 시스템은 물론이며 기존 발전 시스템에도 개조 과정을 거쳐 적용이 용이한 장점이 있다. 하지만 현재 국내에 해당 시스템의 적용 사례는 없을 뿐만 아니라 설계 기술의 확보도 부족한 실정이다. 따라서 순산소 연소 시 발생하는 복합적인 문제를 사전에 예측하고 시스템 구현 과정에서 발생하는 시행착오를 최소화하기 위해서는 순산소 연소 공정모형을 반영한 Dynamic Engineering Simulator 개발이 요구된다. 본 논문에서는 Oxy-PC 발전 시스템의 특징을 기존 공기 연소 발전 시스템과 비교하여 설명하고 Oxy-PC 발전 플랜트용 Dynamic Engineering Simulator 개발 절차에 대해 기술한다.

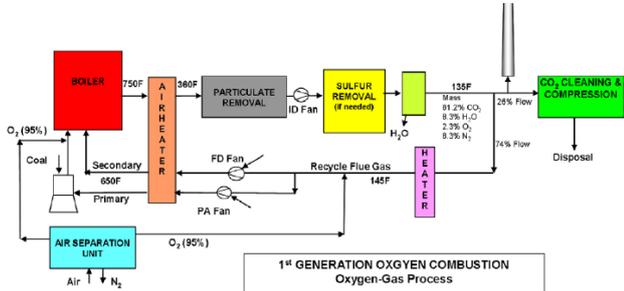
1. 서 론

전력 수요의 증대와 친환경 발전설비의 필요성이 요구됨에 따라 국내외 적으로 발전설비의 새로운 기술연구가 활발하게 진행되고 있다. 기존의 규모, 유형의 발전설비건설과 다른 신기술이 적용된 발전설비건설의 경우 예측하지 못한 운전 특성으로 인한 시행착오나 비효율성에 의해 막대한 비용이 지출된다. 따라서 설계단계에서 연구결과를 검증하기 위해 시뮬레이션 툴을 자주 이용한다. 특히 Dynamic Engineering Simulator는 신기술 연구결과를 발전 설비의 건설 이전에 설계의 적합성을 검증하고 최적의 효율성을 활용하기 위해 사용되며 발전설비의 현장 적용 이전에 설계검증, 설비용량 산출 등의 다양한 활용이 가능하다.

2. 본 론

2.1 Oxy-PC 발전시스템 개요

기존의 공기 연소 발전 시스템과 달리 순산소 연소 시스템에서는 ASU(Air Separation Unit), CPU(CO₂ Processing Unit)등의 새로운 설비가 추가되며 환경 설비의 구성 및 운전에도 변화가 있게 된다. 그리고 공기 연소모드와 순산소 연소 모드 간 스위칭이 가능한 Dual mode 시스템의 경우, 연소 모드의 스위칭, 순산소 연소모드 운전 중 발생할 수 있는 shut down 등에 대한 다양한 변화에서 효과적인 운전이 요구된다.



〈그림 1〉 Oxy-PC 발전 시스템 공정원리[2]

연료가 공기 대신 순산소로 연소될 경우 화염의 온도가 증가하므로 복사 열전달이 증가하고 연소 후 가스에 질소가 포함 되어있지 않아 연소가스에 의한 손실이 줄어들게 되어 효율상승을 도모할 수 있다. 하지만 연소가스의 감소는 대류 열전달의 감소를 초래하므로 연소가스를 순환함으로써 가스유량을 증가시켜 대류 열전달도 충분하도록 한다. 연소가스의 일부만 배출되고 대부분은 순환 하므로 공기연소와 비교하여 CO₂가 약 3.5배 더 농축되어 포집이 유리하다. 하지만 연소로 인한 황 성분과 수증기 농도 또한 증가되어 설비의 부식이나 연소 성능의 저하를 초래할 수 있으므로 적절한 환경 설비와 제습장치의 추가 설치가 요

구된다.

2.2 Oxy-PC 발전시스템 기동 및 운전절차

Oxy-PC 발전 시스템의 초기기동은 공기 연소 발전 시스템에서의 기동과 동일하게 공기연소를 통해 기동되며 부하가 점차 증가하여 minimum stable load(약 40% 부하)에 도달 했을 때 Fan의 air inlet damper가 점차 닫히면서 순환 연소 가스가 공기를 대체하게 되며 순수 산소가 주입되기 시작한다. 순수 산소만으로는 버너로 공급되는 기체의 유량과 대류 열전달 용 가스가 부족하므로 연소가스 재순환을 통해 1차 공기 유량이 확보된다. 연소가스의 65%~80% 정도가 재순환 하므로 공기연소와 비교하여 35%~20%의 연소 공기만이 대기로 배출된다. ASU는 고순도의 산소를 공급할 경우 200MW급 석탄 화력 발전소 기준으로 하루 이상의 순산소 생산 시간이 필요하고 산소 순도를 낮출 경우 초기 기동 준비 시간은 단축이 가능하나 최대부하(full load) 도달 시간이 지연된다.

공기연소에서 순산소 연소 모드로 전환 과정을 정리하면 다음과 같다.

1. FD(Forced Draft), PA(Primary air) Fan으로 공기를 유입하는 Isolation 댐퍼가 열린 상태에서 연소가스 순환 댐퍼가 열려 가스가 FD, PA Fan으로 가도록 유도한다.
2. 순환 댐퍼가 완전히 열리면 Isolation 댐퍼는 점차적으로 닫히게 된다. Isolation 댐퍼가 닫힌 후에도 순환가스 유량이 충분치 않으면 연돌측의 inlet 댐퍼도 점차 닫혀 CO₂ 포집이 가능한 상태가 된다. FD, PA Fan의 Isolation 댐퍼가 완전히 닫히면 보일러는 완전 순환모드로 동작하게 되며 이때 ULD(Unit Load Demand)가 연소 순환가스 요구량(Recycle Flue Gas Demand)를 조절한다.
3. 주입공기 유량을 점차 줄여 최소 산소요구량 수준까지 공기주입을 줄인 뒤 산소를 서서히 주입한다. 순산소 연소를 위하여 순환가스 stream과 버너 lance, 두 부분으로 산소가 주입된다. 이때

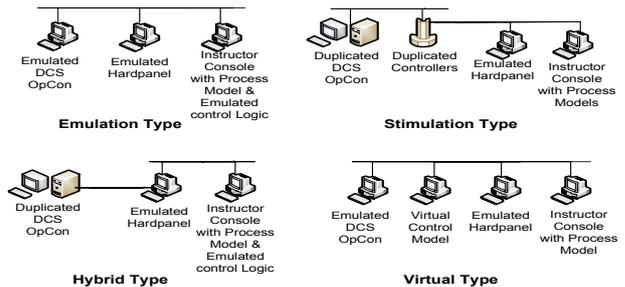
$$ASU\ Demand = (\text{전체 } BTU \text{ 입력에 대응되는 화학적 산소 요구량} + \text{Target excess } O_2 - \text{현재 주입 산소량})$$

이다. (총 산소 요구량은 항상 target excess oxygen이 유지되도록 조절되어야 함) recycle stream에서의 O₂유량은 최소 산소 요구량을 유지하도록 제어되며 버너 lance의 O₂유량은 unit의 전체 산소 요구량에 비례하게 된다.

4. 부하 증가 시 보일러의 열 요구량에 따라 순환가스와 산소 요구량도 증가시킨다.

2.3 발전 시스템 Dynamic engineering Simulator

발전시스템 Dynamic Engineering Simulator는 발전소의 주요 시스템을 전산 프로그램으로 모델링 또는 실제 하드웨어 사용여부에 따라 다음의 4가지 Type으로 구분 될 수 있다.



〈그림 2〉 Simulator type별 분류

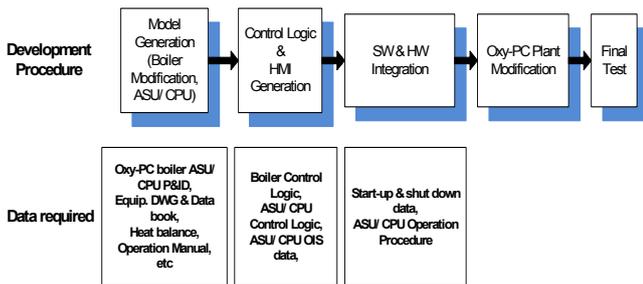
1. Emulation type: 분산제어시스템(Distributed Control System, DCS)의 기능과 HMI(Human Machine Interface) 화면 모두 시뮬레이터 환경에서 개발한 것으로 교육용 및 연구개발용으로 활용이 적합하다.
2. Stimulation type: 플랜트 현장과 동일한 DCS와 HMI 화면을 시뮬레이터용 공정모델과 연계하여 사용하는 것으로 Freeze, Runback, Initial Condition Setting 등의 기능적 제한으로 인해 교육용으로는 부적합하다.
3. Hybrid type: 제어 모델(Control Logic)은 시뮬레이터 환경에 적합하도록 변환된 제어시스템을 개발하고 플랜트에서 사용되는 HMI와 연계하여 사용하는 것으로 Emulation type과 Stimulation type의 조합된 형태라 할 수 있다.
4. Virtual Type: DCS 및 HMI 화면이 동일하게 실행되는 특정 컴퓨터와 공정 모델을 연계하여 운영되는 시뮬레이터로 제어방식 및 HMI 화면이 플랜트 현장과 동일하여 운전원 교육외에 플랜트 제어시스템 신설, 개보수 이전 제어시스템의 검증, 제어요원 교육 등에 활용이 가능하다.

2.4 Oxy-PC 발전 플랜트용 Dynamic Engineering Simulator 개발

Oxy-PC 발전 시스템은 신규설비 뿐만 아니라 기존 설비의 개조작업을 통해서도 적용이 가능하다. 본 논문에서는 기존 발전 설비의 개조를 통한 Oxy-PC 발전 시스템 구축 시 Simulator 개발 절차에 대해서 설명하도록 한다. 이 경우 시뮬레이터 개발 절차는 기존 발전시스템 공기연소 발전시스템 Simulator 개발(1단계)과 1단계에서 개발된 Simulator 데이터를 기반으로 한 Oxy-PC용 Dynamic Engineering Simulator 개발(2단계)의 두 단계를 거쳐게 된다.

2.4.1 공기연소 발전시스템 Simulator 개발

기존 공기 연소 발전시스템 시뮬레이터 개발 절차는 <그림3>에서와 같이 공정모델 개발(Model Generation), 제어모델 및 HMI 화면 개발(Control Logic & HMI Generation), SW와 HW 통합(SW& HW Integration), 정특성 및 동특성 테스트를 통한 신뢰성 검증(Pre Test & Verification)의 절차를 거치는 것이 일반적이다.

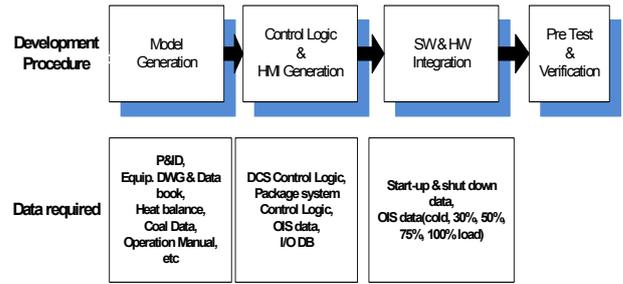


<그림 3> 공기 연소 발전시스템 Simulator 개발절차

공정모델 개발 단계에서는 P&ID(Piping & Instrument Diagram), 설비 자료, Heat Balance, 연료 성분분석 자료, 운전자료 등을 기반으로 실제 공정과 유사한 모델을 개발하며, 제어모델 및 HMI 화면 개발 단계에서는 실제 운전되고 있는 제어로직 및 운전 화면을 바탕으로 시뮬레이터 환경에서 구동되는 모델과 HMI 화면을 구성한다. 공정모델 및 제어모델, 운전화면 등의 소프트웨어와 하드웨어의 개별적인 구성 작업이 완료되면 통합과정을 거쳐 실제 운전환경과 유사한 Simulator 환경을 구축하고, 마지막으로 실제 운전 데이터와 비교를 통해 성능 검증을 실시한다. 공기연소 발전 시스템 Simulator 개발 후 이어지는 Oxy-PC 발전용 Simulator 개발 단계에서 이 시뮬레이터를 기반으로 modification 작업이 진행되므로 다양한 검증을 거쳐 높은 신뢰도 및 실제 환경 모사도를 확보해야 한다.

2.4.2 Oxy-PC 발전시스템 Simulator 개발

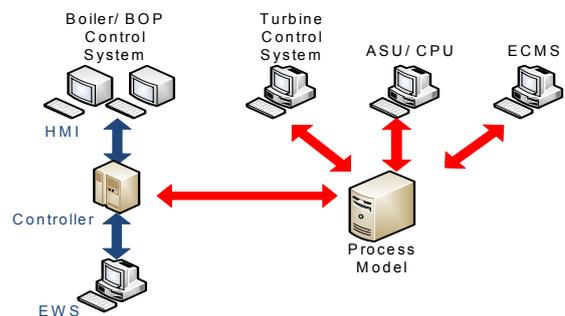
Oxy-PC 발전시스템 Simulator 개발 단계에서는 공기연소 발전 시스템의 Simulator 개발 단계에서 구현된 공정모델을 기반으로 Oxy-PC 보일러 모델로 수정, ASU/ CPU 등의 모델이 추가 되고(Model Generation), 이에 대한 제어모델 및 HMI 화면의 개발(Control Logic & HMI Generation), SW와 HW 통합(SW& HW Integration), Oxy-PC plant modification (feedback & Tuning), 최종 테스트의 과정(Final Test)을 거쳐게 된다.



<그림 4> Oxy-PC발전 시스템 Simulator 개발절차

공정 모델 개발 단계에서는 1단계에서 공기연소 모델로 구성되어있던 보일러의 공정 모델을 적절한 복사, 대류 모델을 사용하여 Oxy-PC 보일러 공정 모델로 수정 작업이 요구된다. 이외에도 순산소 연소로 인해 공정 모델 변화가 수반되는 계통(Air system, 환경설비 등)의 수정작업, ASU/ CPU와 같은 신규 설비에 대한 공정모델 추가, 순산소 연소 시 Heat Balance 반영 등의 작업이 필요하다. 특히 각 부하별 공급 산소 및 순환가스 유량을 분석하고 이때의 보일러 내(Furnace, Superheater, Reheater, Economizer 등)의 온도 분포와 증주기 압력, 온도, 유량 등의 분석을 통해 실제 공정과 유사한 공정모델 개발이 요구된다. 제어모델 및 HMI 화면 개발 단계에서는 순산소 연소 모드 운전에 필요한 제어모델 및 HMI화면이 추가, 보완된다. 주로 Air System과 공기 연소모드에서 순산소 연소 모드로 전환 시에 필요한 제어모델 개발, ASU/ CPU 설비의 제어 모델 및 운전화면 추가가 중점적으로 이루어진다. Oxy-PC plant modification 단계에서는 Oxy-PC 발전 시스템으로 개조되면서 조정되어야 하는 제어기의 파라미터 설정 값 등을 tuning하고 피드백을 통하여 실제 공정과 차이나는 부분을 수정, 보완한다.

시뮬레이터 Type 선정 시 보일러, 연소공기 계통은 Oxy-PC 발전 시스템 개조 시 로직이나 HMI 변동 사항이 큰 부분 이므로 실제 플랜트 현장에서 적용될 제어 시스템의 HMI와 제어로직 설계 tool을 적용하여 신뢰도를 확보하고 수정, 보완 작업도 쉽게 처리되도록 하는 것이 효과적이다. 터빈 제어 계통은 변동 사항이 미미하므로 Emulation type으로 구성하는 것이 경제성이 있다.



<그림 5> Oxy-PC용 Dynamic Engineering Simulator 구성 예

3. 결 론

본 논문에서는 Oxy-PC 발전 플랜트의 운전 특성과 그에 따른 Dynamic Engineering Simulator 개발 절차와 특성에 대해 기술하였다. 기후 변화로 인한 화석연료 발전플랜트의 이산화탄소 배출량 감축이 국내외적으로 큰 관심을 가지고 있는 시점에서 Oxy-PC 발전 플랜트는 효과적인 대안이 될 수 있으며, Oxy-PC 설계 및 실증 적용 사례가 부족한 만큼 Dynamic Engineering Simulator 개발을 통한 시행착오 예방과 신뢰성 있는 자동 제어 기술 확보는 필수적이라고 할 수가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김중안, "영동1호기 제어계통 분석보고서", 전력연구원 TM, 11' 전력연 - 단0193, 2011
- [2] D. McDonald and A. Zadiraka, "Control of Pulverized Coal Oxy-Combustion Systems", 17th Annual Joint ISA POWID/EPRI Controls & Instrumentation Conference, 2007
- [3] Shinn Deng and Rory Hynes, "Thermodynamic Analysis and Comparison on Oxy-Fuel Power Generation Process", Journal of Engineering for Gas turbines and Power, Vol. 131/ 053001(1-7), 2009
- [4] 전력연구원, "Dynamic Engineering Simulator를 이용한 Oxy-PC 발전 플랜트 제어기술개발", 지식경제 기술혁신사업 계획서, 2010